基于全局优化策略的某燃料电池车动力经济性验证

辛伟伟[1]，韦尚军[2]，郑伟光[1,2]，张 平[1]

（1. 桂林电子科技大学 机电工程学院，广西 桂林 541004；
2. 东风柳州汽车有限公司 商用车技术中心，广西 柳州 541005）

摘 要：为验证某款燃料电池商用车动力系统选型的合理性，以该款车型动力系统的关键参数为基础，在Matlab仿真平台上搭建包含复合能量源（包含燃料电池和蓄电池包）、电机系统（包含驱动电机和电机控制器）及车辆传动系统（包含主减速器和车轮）的模型。采用基于动态规划算法的全局优化能量管理策略，设定空载、半载和满载3种载重模式，以欧洲典型行驶工况EUDC_LOW为仿真工况，分析车辆在不同载重模式下的动力经济性。仿真结果显示，在3种载重模式下，车辆配置的复合能量源均能满足车辆在指定行驶工况下的功率要求，但随着车辆载重的增大，蓄电池包终端SOC逐渐偏离初始值，考虑到商用车需要在大载重的模式下工作较长时间，较低的SOC不利于车辆保持最佳的动力性。针对该车型的验证结果表明，在后续的研究和实车验证中，应考虑配置功率更大的车载燃料电池。

关键词：燃料电池汽车；商用车；能量管理策略；动态规划；载重模式

中图分类号：U462　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-808X(2022)00-0000-00

Energy management strategy for fuel cell commercial vehicle based on dynamic programming

XIN Weiwei[1], WEI Shangjun[2], ZHENG Weiguang[1,2], ZHANG Ping[1]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. Commercial Vehicle Technology Center, Dong Feng Liuzhou Automobile Co., Ltd, Liuzhou 545005, China)

Abstract: To test the rationality of the power system for a fuel cell commercial vehicle, the models of energy source (including fuel cell stack and battery pack), electric motor system (including electric motor and its controller) and driveline are built in Matlab. A global optimization energy management strategy based on dynamic programing is adopt to analysis the vehicle's fuel economy with the European typical drive cycle under three load modes (including no-load, half-load and full-load). Simulation results show that the energy source employed satisfy the vehicle's power requirements at the selected drive cycle, while with the increase of on-board load, the terminal SOC of battery gradually deviates from the initial value, which will limit the commercial vehicle's dynamic performance in the long term cycles with a large on-board load. Verification results for the vehicle point that great power on-board fuel cell stack should be considered in the following research and vehicle verification.

Key words: fuel cell vehicle; commercial vehicle; energy management strategy; dynamic programming; load modes

随着传统化石能源燃烧造成的环境污染和能源安全问题日益引起人们的重视，世界各国相继出台新能源政策，采取各种举措以缓解上述问题。作为化石能源消耗的大户，交通运输业正处于产业升级的十字路口，新能源汽车及其相关技术的研究逐渐成为促进交通运输产业链良性有序发展的必要选项。在当前主要的新能源汽车构型中，氢燃料电池汽车因零污染、燃料可再生、系统效率高及续航里程远等特点成为最具竞争力的候选方案之一[1-4]。

由于燃料电池的自身放电特性偏软且动态响应

收稿日期：2021-03-19
基金项目：广西创新驱动项目（桂科AA18242033）；柳州科技计划项目（2020GAAA0403；2019AD10203）
通信作者：郑伟光（1984—），男，副教授，博士，研究方向为新能源汽车和噪声主动控制。E-mail：weiguang.zheng@foxmail.com
引文格式：辛伟伟，韦尚军，郑伟光，等. 基于全局优化策略的某燃料电池[J]. 桂林电子科技大学学报，2022，42(4)：

较慢,单一的燃料电池能量源并不能满足复杂多变的行车环境[5-7]。考虑到车辆的动力要求及动力源寿命等问题,燃料电池汽车一般会匹配1个辅助能量源与燃料电池共同驱动车辆。通常情况下该辅助能量源由单一的电池包或单一的超级电容构成[8],也有一些学者[9-10]在研究中会匹配由动力电池和超级电容构成的复合辅助能量源。在氢燃料电池汽车中,复合能量源的功率分流主要依赖于整车的能量管理系统。目前,常见的能量管理策略包含规则型控制策略(包括基于确定规则的能量管理策略[11-12]和基于模糊逻辑规则的能量管理策略[13])和优化型控制策略(包括瞬时优化策略[14-15]以及全局优化策略[16-17]),其中全局优化策略基于动态规划(dynamic programming,简称DP)或庞特里亚金最小值原理(pontryagin's minimum principle,简称PMP),在确定的工况信息条件下,能够获取全局最优的控制规则,进而获得符合当前行程的最优氢耗。

以采用复合动力源(氢燃料电池匹配蓄电池包)的氢燃料混合动力电池的汽车为研究对象,以东风柳州汽车有限公司某款燃料电池商用车为原型,采用基于动态规划算法的全局优化能量管理策略,对车辆的动力经济性进行验证。

1 车辆模型构建

氢燃料电池混合动力汽车动力系统车辆构型图,如图1所示。

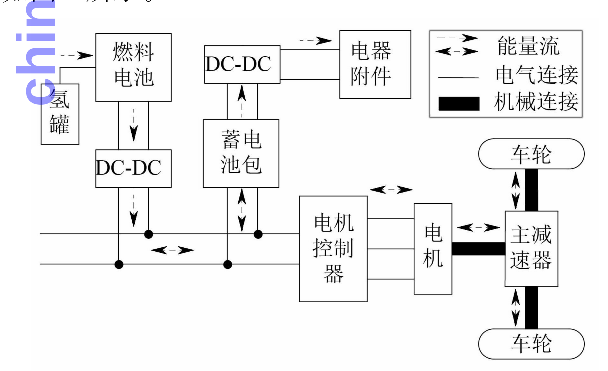


图1 车辆构型

系统主要包含质子交换膜燃料电池、DC-DC变换器、蓄电池包、电机及其控制器、传动系统及其他电气附件。燃料电池作为车辆的主能量源,只向车辆输出能量,故与燃料电池堆匹配的DC-DC变换器也是单向的。蓄电池除用于输出电能之外,还负责接收燃料电池的多余电能以及回收制动状态的能量。此外,蓄电池包还搭配1个高压转低压的DC-DC变换器,为车辆低压附件提供电能,车辆参数如表1所示。

表1 车辆参数

参数	数值
整车质量(满载)/kg	9 000
整车质量(空载)/kg	5 200
车轮滚动半径/m	0.413
滚动阻力系数	0.015
空气密度/(kg·m^{-3})	1.2
空气阻力系数	0.563
车辆迎风面积/m^2	6.645 4
主减速比	6.124
燃料电池最大功率/kW	30
燃料电池峰值效率/%	59.6
蓄电池包电量/kW·h	46.7
总线额定电压/V	525.6
电机最大功率/kW	116

1.1 车辆的纵向动力学建模

车辆在平直路面行驶时,车身纵向力对车辆的燃油经济性起决定性作用,故模型搭建主要考虑车辆的纵向动力学特性,而忽略横向动力学对车身稳定性的影响。

车辆在道路上正常行驶时,其行驶阻力包含轮胎滚动阻力 F_f、空气阻力 F_w、坡度阻力 F_i 及加速阻力 F_a,车辆驱动力满足

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_a = mgf\cos\alpha + \frac{1}{2}\rho C_d A_f v^2 + mg\sin\alpha + m\frac{dv}{dt}, \tag{1}$$

其中:m 为车辆总质量;g 为重力加速度;f 为滚动阻力系数;α 为路面倾角;ρ 为空气密度;C_d 为空气阻力系数;A_f 为车辆迎风面积;v 为车速。

设定车辆驱动力在牵引状态下为正,在制动状态下为负。基于给定的车辆参数,电机需求扭矩 T_m、需求转速 w_m 及需求功率 P_m 的函数分别为:

$$T_m = \begin{cases} \dfrac{r_w F_t}{\eta_{fd} r_{fd}}, F_t \geq 0; \\ \dfrac{r_w F_t \eta_{fd}}{r_{fd}}, F_t < 0; \end{cases} \tag{2}$$

$$\omega_m = \frac{v r_{fd}}{r_w}, \tag{3}$$

$$P_m = \begin{cases} \dfrac{T_m \omega_m}{\eta_m}, F_t \geq 0; \\ T_m \omega_m \eta_m, F_t < 0。 \end{cases} \tag{4}$$

其中:r_w 为车轮转动半径;η_{fd}、r_{fd} 分别为主减速器的效率和传动比;η_m 为电机效率,可通过查找电机

MAP 图获得。

1.2　燃料电池的建模

常见的燃料电池仿真模型包含机理模型、电化学模型、神经网络模型及效率模型。考虑到仿真时长因素的影响,建模选用最为简单的效率模型。

燃料电池的效率曲线可通过实验获得,燃料电池的功率—效率曲线如图 2 所示。

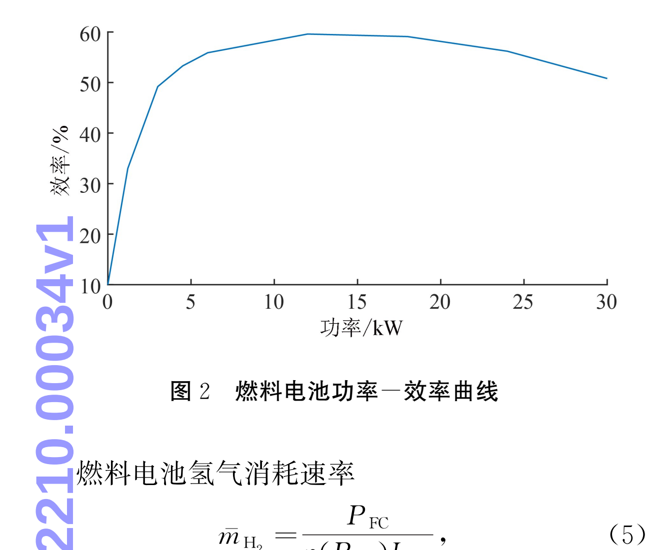


图 2　燃料电池功率—效率曲线

燃料电池氢气消耗速率

$$\bar{m}_{H_2}=\frac{P_{FC}}{\eta(P_{FC})L_{H_2}}，\tag{5}$$

其中,L_{H_2} 为氢气的低热值。$\bar{m}_{H_2}$ 与功率 P_{FC} 的关系如图 3 所示。

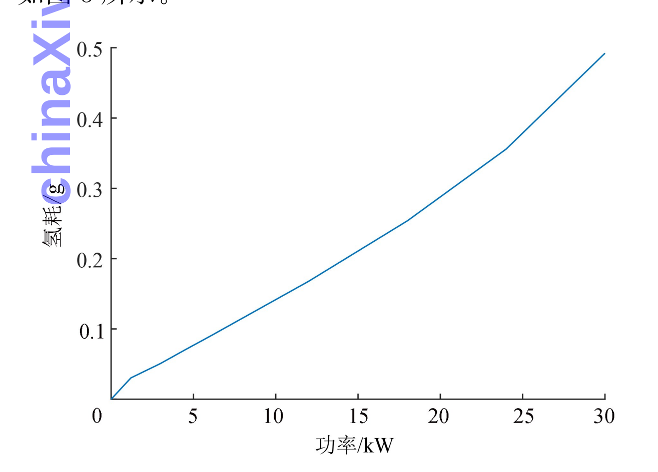


图 3　燃料电池氢耗曲线

1.3　蓄电池包的建模

蓄电池包模型采用广泛使用的等效电路模型,其机理如图 4 所示[18]。

在该模型中,电池被等效为 1 个理想电压源 V_{oc} 和 1 个电阻 R_{int},则蓄电池包输出功率 P_b 可描述为电流 I_b 的函数,

$$P_b=V_{oc}I_b+I_b^2R_{int}，\tag{6}$$

图 4　蓄电池等效电路

蓄电池包荷电状态(state of charge, 简称 SOC)的变化速率满足

$$S=-\frac{V_{oc}-\sqrt{V_{oc}^2-4P_bR_{int}}}{2R_{int}Q_b}。\tag{7}$$

1.4　电机的建模

仿真中采用的电机参数如表 2 所示。

表 2　电机参数

参数	数值
电机类型	永磁同步电机
额定功率/kW	80
峰值功率/kW	160
额定扭矩/Nm	600
峰值扭矩/Nm	1 100
额定转速/(r·min^{-1})	1 270
峰值转速/(r·min^{-1})	4 500

在燃料电池汽车中,电机作为电能与驱动系统动能能量转换的唯一装置,当车辆处于驱动状态时,电机充当电动机的角色,将燃料电池和蓄电池包提供的电能转化为机械能,驱动车辆前进;当车辆处于制动状态时,电机充当发电机的角色,将制动机械能转化为电能,回收制动能量,为蓄电池包充电。电机的效率(MAP)可描述为转矩和转速的函数,其 MAP 图如图 5 所示。

2　燃料电池汽车能量管理策略

2.1　动态规划算法

燃料电池汽车的能量管理优化可视作一个多阶段决策问题。动态规划算法作为解决多阶段决策过程最优化的一种数学方法,可协助完成车辆能量管理的全局优化问题[19-21]。

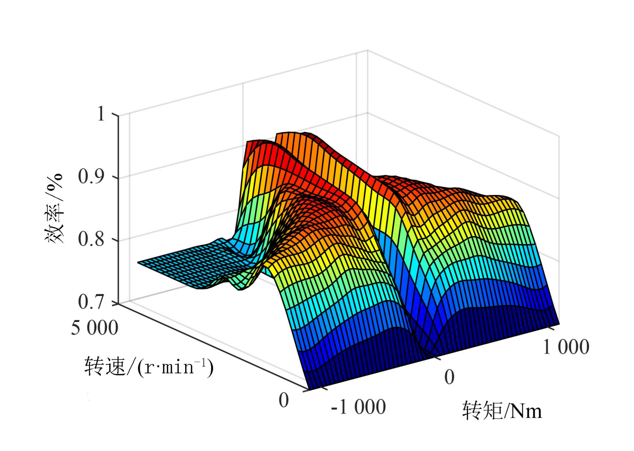


图 5 电机 MAP

假设存在一个多阶段决策问题，其可用状态转移方程描述，

$$s(k+1)=T(s(k),u(k))。\tag{8}$$

其中：$s(k)$ 为第 k 阶段时的状态变量，一般选择不可控因素作为系统的状态变量：$u(k)$ 为第 k 阶段的决策变量。

当某个阶段的状态变量确定后，系统根据不同的决策变量演化到下一个阶段，进而系统从初始状态演化到最终状态并形成若干策略集合。同时，借助设定的指标函数（式(9)）获得所有子决策过程对应的消耗成本，最终获得最优值（最大或最小）的指标函数，其对应的决策就是全局最优的决策。

$$V_{k,n}=\sum_{j=k}^{n}v_j(s_j,u_j)。\tag{9}$$

其中：s_j 和 u_j 分别为 j 时刻系统的状态变量和决策变量；$v_j(s_j,\ u_j)$为 j 时刻系统在 s_j 状态下采用决策 u_j 所对应的成本指标；V_{k-n} 为系统由当前时刻 k 至终端时刻 n 所对应的总成本指标。

2.2 基于动态规划的能量管理策略

在燃料电池汽车的能量管理策略中，选定蓄电池包的 SOC 为系统的状态变量、蓄电池包输出功率 P_b 及燃料电池输出功率 P_{FC} 为决策变量，其状态转移方程为

$$SOC_{k+1}=SOC_k+f_k(SOC_k,P_{FC},P_b),\quad k=1,2,\cdots,N;\tag{10}$$

且满足

$$P_m=P_{FC}+P_b。\tag{11}$$

定义指标函数为整个工况的燃料消耗：

$$J=\sum_{k=1}^{N}\bar{m}(x_k,u_k,v_k)\Delta t,\tag{12}$$

其中：$\bar{m}(x_k,u_k,v_k)$ 为第 k 阶段的燃油消耗；Δt 为每个阶段的时间长度，仿真中定义为 1 s。此外，考虑到各动力部件的物理约束，对燃料电池汽车动力系统参数施加限制：

$$\begin{aligned}&T_{m_min}\leqslant T_m\leqslant T_{m_max},\\&\omega_{m_min}\leqslant\omega_m\leqslant\omega_{m_max},\\&I_{b_min}\leqslant I_b\leqslant I_{b_max},\\&P_{b_min}\leqslant P_b\leqslant P_{b_max},\\&P_{FC_min}\leqslant P_{FC}\leqslant P_{FC_max},\\&SOC_{min}\leqslant SOC\leqslant SOC_{max}。\end{aligned}\tag{13}$$

3 仿真结果分析

应用 MATLAB 编程中的动态规划算法进行仿真，采用欧洲标准工况 EUDC_LOW 对控制策略进行验证，EUDC_LOW 工况速度－时间曲线如图 6 所示。

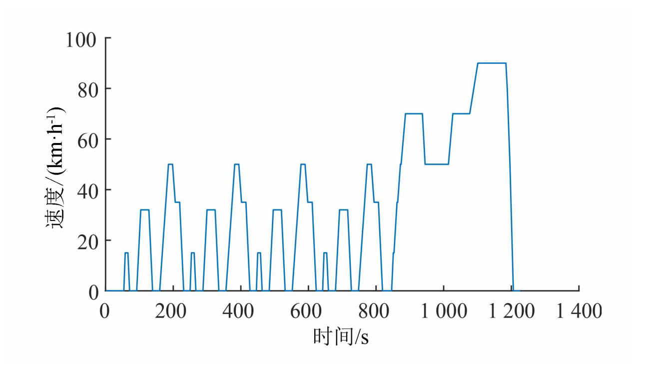


图 6 EUDC_LOW 工况

分别在空载、半载、满载情况下对车辆的动力性能进行仿真测试。3 种情况下蓄电池包 SOC 变化曲线如图 7 所示。车辆分别处于空载、半载、满载时，由于燃料电池型号较小且负载较大，导致终端 SOC 小于初始 SOC，且载重越大，终端 SOC 偏离初始值越远。在后续的车辆开发中，需要适配功率更大的燃料电池以满足车辆的动力需求。

3 种载重模式下电机需求功率、燃料电池、蓄电池包输出功率与时间的关系如图 8 所示。

在不同载重模式下，车辆适配的复合能量源均能满足电机功率需求，车辆满足给定工况下正常行驶需求。在空载、半载、满载 3 种状态下，燃料电池整体输出功率变化不大，较长时间处于大功率输出工作状态，同时这也是燃料电池工作效率较高的区间。

在单一载重情况下（如图 8(a)），蓄电池包输出的部分功率用于满足电机需求，比较图 8(a)、(b)和(c)，由于电机的需求功率随载重变化较大，燃料电池功率范围较小，导致蓄电池包输出功率变化范围较大。

3 种载重模式下，车辆经济性仿真结果如表 3 所

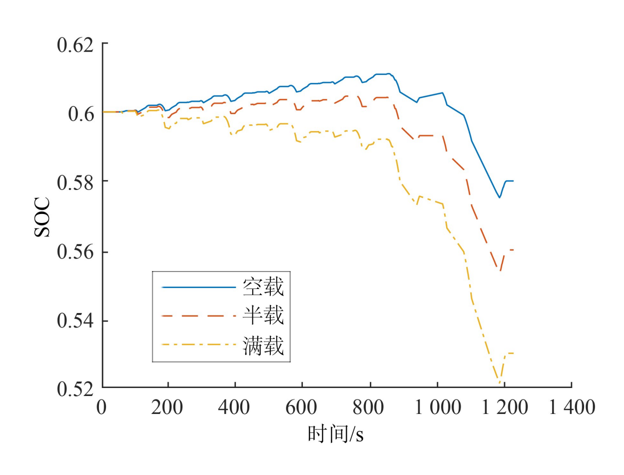
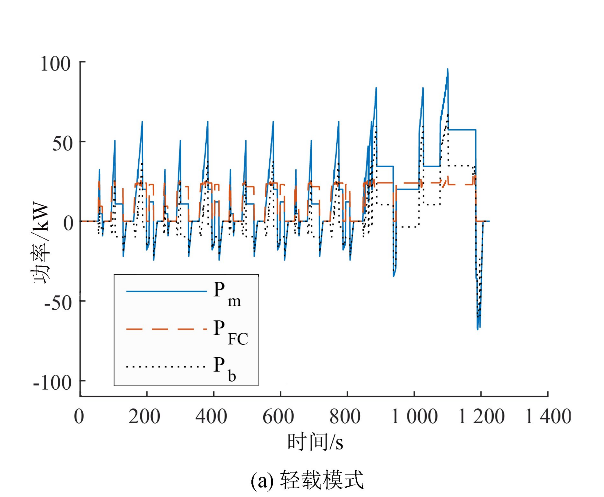
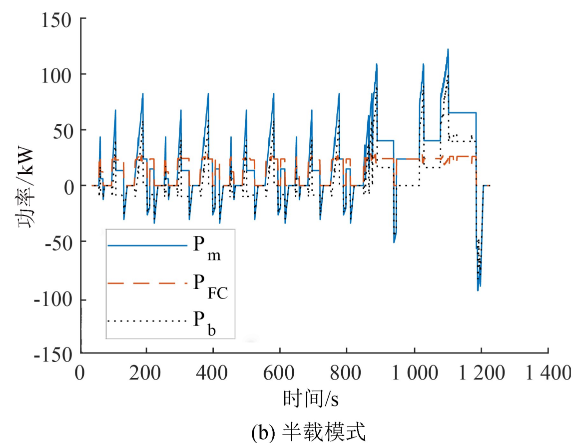


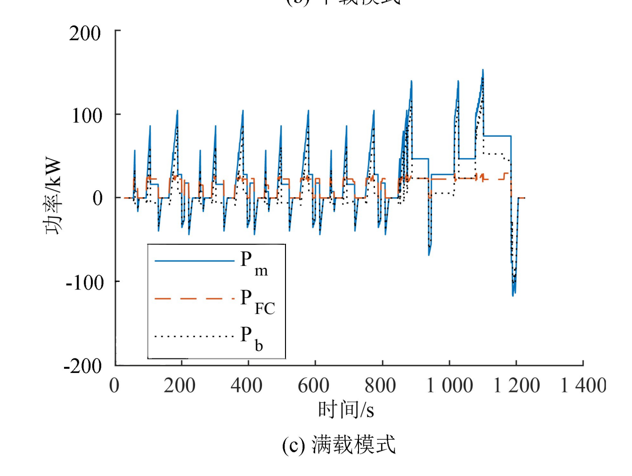
图 7 蓄电池包 SOC 变化曲线



(a) 轻载模式



(b) 半载模式



(c) 满载模式

图 8 3 种载重模式下功率与时间的关系

示,将起始与终端 SOC 差值等效转化为氢耗。随着载重质量的增大,蓄电池包 SOC 逐渐偏离初始 SOC,整车等效氢耗量也逐渐增加。

表 3 经济性仿真结果

负载模式	项目	数值
空载	氢耗/g	298.65
	起始 SOC	0.6
	终端 SOC	0.579 9
半载	氢耗/g	368.10
	起始 SOC	0.6
	终端 SOC	0.559 9
满载	氢耗/g	445.02
	起始 SOC	0.6
	终端 SOC	0.529 9

4 结束语

以某款燃料电池商用车为原型,采用基于动态规划的全局最优能量管理方法对车辆的动力经济性进行验证。仿真结果表明,车辆适配的复合能量源满足给定工况车辆在空载、半载、满载 3 种模式下正常行驶需求,但随着车辆载重的增大,车辆的 SOC 下降较快。考虑到重型商用车长期工作于大载重、长航时工况,较低的 SOC 不利于保持车辆处于最佳动力性,严重时,甚至会导致车辆无法正常运行。在之后的研究及车辆开发中,将为车辆适配峰值功率更大的燃料电池,以提高车辆的动力经济性。

参考文献:

[1] ZHANG Ridong, TAO Jili. GA-Based fuzzy energy management system for FC/SC-Powered HEV considering H2 consumption and load variation[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(4): 1833-1843.
[2] 邵志刚,衣宝廉.氢能与燃料电池发展现状及展望[J].中国科学院院刊,2019,34(4):469-477.
[3] WANG Yujie, SUN Zhendong, CHEN Zonghai. Rule-based energy management strategy of a lithiumion battery, super capacitor and PEM fuel cell system[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 2555-2560.
[4] 熊子昂,彭洪亮,向华,等.水氢燃料电池控制策略[J].桂林电子科技大学学报,2018,38(2):144-149.
[5] SAMI H K, RABIH J, RIAD C. Optimal energy man-

agement of hybrid fuel cell electric vehicles[J]. SAE Technical Paper, 2015, 1, 1359.

[6] 徐陈锋. 基于自适应模糊策略的燃料电池车混合动力系统控制[D]. 杭州：浙江大学, 2017：6-9.

[7] 王骞. 电_电混合燃料电池汽车动力系统设计及能量管理研究[D]. 武汉：华中科技大学, 2019：11-26.

[8] GUZZELLA L, SCIARRETTA A. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2013.

[9] AMIN, BAMBANG R, ROHMAN A, et al. Energy management of fuel cell/battery/super-capacitor hybrid power sources using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 1992－2002.

[10] THOUNTHONG P, RAËL S, DAVAT B. Energy management of fuel cell/battery/super-capacitor hybrid power source for vehicle applications[J]. Journal of Power Sources, 2009, 193(1): 376-385.

[11] BUNTIN D L, HOWZE J W. A switching logic controller for a hybrid electric/ICE vehicle[C]//American Control Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995: 1169-1175.

[12] 谢星, 周苏, 王廷宏, 等. 基于 Cruise/Simulink 的车用燃料电池/蓄电池混合动力的能量管理策略仿真[J]. 汽车工程, 2010, 32(05): 373-378.

[13] HEMI H, GHOUILI J, CHERITI A. A real time fuzzy logic power management strategy for a fuel cell vehicle[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80: 63-70.

[14] PAGANELLI G, DELPRA S, GUERRA T M, et al. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains [C]//IEEE 55th Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002: 2076-2081.

[15] 张国瑞, 李奇, 韩莹, 等. 基于运行模式和动态混合度的燃料电池混合动力有轨电车等效氢耗最小化能量管理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6905-6914.

[16] ZHOU Wei, YANG Lin, CAI Yishan, et al. Dynamic progra-mming for New Energy Vehicles based on their work modes part I: Electric Vehicles and Hybrid Electri-c Vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2018, 406: 151-166.

[17] 洪志湖, 李奇, 陈维荣. 基于 PMP 的机车用燃料电池混合动力系统能量管理策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3867-3878.

[18] MARKEL K, BROOKER A, HENDRICKS V, et al. ADVISOR, a system tool for advanced vehicle modeling[J]. Journal of Power Source, 2002, 110(2): 255-266.

[19] 张风奇, 胡晓松, 许康辉, 等. 混合动力汽车模型预测能量管理研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 86-108.

[20] SUN Chao, HU Xiaosong, Scott J, et al. Velocity prediction for predictive energy management in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 3(23), 1197－1204.

[21] FARES D, CHEDID R, PANIK F, et al. Dynamic programming technique for optimizing fuel cell hybrid vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(24): 7777-7790.

编辑：